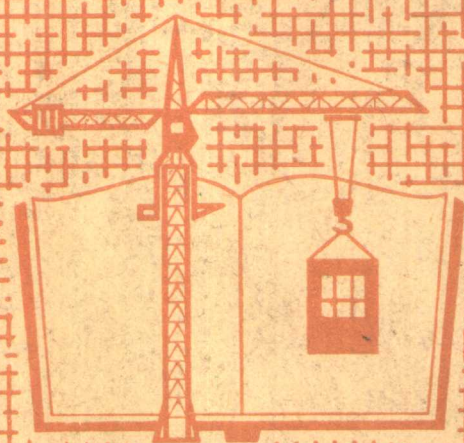


地下防护结构

清华大学 等 编



高等学校试用教材

中国建筑工业出版社

高等学校试用教材

地下防护结构

清华大学等编

·限国内发行·

中国建筑工业出版社

本书介绍地下防护工程结构设计的一般原理，重点讲述抗爆结构动力分析和动力性能的基本概念以及结构设计的一般准则。本书用作高等学校试用教材，并可供工程技术人员学习和参考。

高等学校试用教材
地下防护结构
清华大学等 编

· 限国内发行 ·

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本：787×1092毫米 1/16 印张：12 字数：287 千字

1982年12月第一版 1982年12月第一次印刷

印数：1—5,100册 定价：1.25 元

统一书号：15040·4365

前 言

地下防护工程设计是高等学校地下建筑专业或专门化的一门专业课程。本教材主要介绍结构设计内容，着重讲解设计所需要的基础知识和设计的一般原理。书中引述的武器效应参数及计算公式主要引自国外的或公开的资料，目的只是为了说明概念，在设计具体的工程时，应以我国有关部门的设计规程及其规定的设计方法为准，后者在设计参数和计算方法上与本书引用的有出入。

本书第四章的第三、四、五、七节以及第五章的第四节不作为讲授内容，仅为阅读参考材料。

参加本书编写工作的有：清华大学、哈尔滨建筑工程学院、天津大学、重庆建筑工程学院、同济大学、西安冶金建筑工程学院等，有关人员有：陈肇元、何玉敖、宋文天、李怀方、叶瑞铭、陆浩亮。初稿编写人为陈肇元（第一、三、四、六、七、八章及附录）、宋文天（第二章）、何玉敖（第五章）。全书最后由清华大学陈肇元、王志浩统一修改、增删后定稿。

哈尔滨建筑工程学院地下建筑教研室张晓漪、高伯扬同志承担本书的主审任务。在编写过程中，承钱七虎、孙乃光和王年桥同志审阅初稿并给予许多帮助。

编者

1982.5.

目 录

第一章 武器作用概述	1
第一节 核武器的杀伤破坏作用	1
第二节 常规武器对工事的作用	4
第三节 地下工事的防护原则	5
第二章 核爆炸空气冲击波及其荷载	7
第一节 空气冲击波特性和	7
第二节 核爆时的地面空气冲击波	9
第三节 孔口空气冲击波参数	13
第三章 应力波的基本概念	18
第一节 弹性波	18
第二节 弹塑性波	25
第三节 土中压缩波	34
第四章 结构动力分析	39
第一节 概述	39
第二节 单自由度集中质量体系的动力分析	45
第三节 单自由度体系的设计计算图表	56
第四节 运动微分方程的数值分析方法	64
第五节 分布质量构件按等效体系的动力分析	73
第六节 等效静载法	90
第七节 拱形和框架结构按多自由度体系的动力分析	98
第五章 地下结构荷载	104
第一节 概述	104
第二节 土中结构荷载的简化确定方法	106
第三节 按一维波理论分析相互作用	109
第四节 土中结构荷载和自振频率的讨论	115
第六章 结构材料和构件的动力性能	118
第一节 结构材料在快速变形下的性能	118
第二节 钢筋混凝土构件的抗弯性能	121
第三节 钢筋混凝土构件的抗压、抗剪性能	125
第四节 构件动力设计的几个问题	127
第七章 结构设计的一般准则与步骤	130
第一节 防护结构抗爆设计的特点	130
第二节 结构设计的一般准则	132
第三节 等效静载法设计的一般步骤	133
第四节 截面设计及构造要求	137
第五节 防空地下室的设计特点	139
第六节 结构设计算例	140
第八章 防护门、门框墙等口部结构	152
第一节 防护(密)门设计	152
第二节 门框墙设计	161
第三节 空气冲击波作用下的其他口部构件	167
附录 钢筋混凝土结构的极限荷载	168
参考资料	185

第一章 武器作用概述

防护工程应能抵抗预定武器的破坏作用。各种等级的防护工程就是按照“战术技术要求”规定的不同防护能力进行设计的。防护的对象通常包括核武器、普通装药的炮弹（常规武器）、化学及生物武器。

第一节 核武器的杀伤破坏作用

利用原子核裂变反应（原子弹）或聚变反应（氢弹）时突然释放的巨大能量起杀伤破坏作用的武器称为核武器。核武器的威力用能量与其相当的普通炸药梯恩梯（TNT即三硝基甲苯）的重量来表示，称为当量。原子弹的当量小于几十万吨，氢弹的当量可从几十万到几千万吨。

核武器在空气中爆炸时的破坏杀伤因素主要有：空气冲击波、热辐射、早期核辐射和放射性沾染及电磁效应等。除放射性沾染能在较长时间内起作用外，其余的作用时间均甚短暂。

核武器在空气中的爆炸方式通常有空爆和地爆二种。核爆时产生明亮的火球，如火球表面接触地表称为地爆，否则为空爆。空爆产生的空气冲击波能大面积地摧毁地面设施并危及抗力较低的地下工事。空爆的热辐射也能引起地面易燃物体的大面积燃烧。相对来说，地爆对地面设施的杀伤范围较小，但能量比较集中，主要用来破坏坚固的地下工事。

核武器接地爆炸能造成巨大弹坑并产生极其强烈的地震波，一些重要的地下工事要考虑这种强震对于人员和设备的杀伤破坏作用。

1. 空气冲击波

核武器空中爆炸时，反应区内的高温高压气团猛烈向外扩张，冲击和压缩邻近的空气，形成空气冲击波向外围传播。冲击波来到时，地面上的空气超压（超过正常大气压的那部分压力称为超压）从零瞬时升到峰值，然后逐渐衰减到零，并紧接着出现负压，负压逐渐达到最大值后又恢复到零，于是整个冲击波就算过去了（图1-1）。地面冲击波超压的各个参数（超压峰值 ΔP_0 、最大负压 ΔP_- 、正压作用时间 t_+ 、负压作用时间 t_- ）决定于核武器的当量、爆高、以及该处地面到爆心投影点的距离。

以100万吨氢弹爆炸为例，当离地1.5公里高度空爆时，起爆后1.3秒，冲击波可到达爆心投影点地面，有地面冲击波超压峰值 ΔP_0 约 6 kg/cm^2 ，起爆后约2.3和4.9秒，冲击波可到达离爆心投影点1.4和2.8公里处地面， ΔP_0 为 3 kg/cm^2 和 1 kg/cm^2 。100万吨氢弹地爆时，爆后约0.6、0.8和3.5秒，冲击波可到达离爆心约1.1、1.5和2.6公里处，有 ΔP_0 值分别为6、3和 1 kg/cm^2 ，与此相应的最大负压值约为 $0.30 \sim 0.13 \text{ kg/cm}^2$ 。

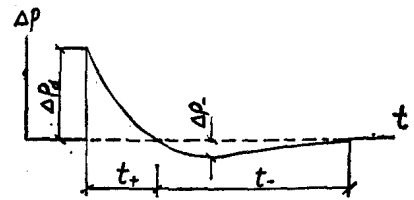


图 1-1 地面空气冲击波超压波形

工事所在地面的空气冲击波超压，是防护结构设计的主要依据。“超压”是气体被压缩后产生的压力。处于冲击波包围或与之接触的物体，其表面无不受到超压的挤压作用，不论冲击波的传播方向如何，超压总是垂直压向物体各个表面的。除此以外，冲击波内的气体分子又有很大的运动速度，这股高速运动的又被压密了的气流就象飓风一样，具有“动压”作用，其机理类如风压，但其强度可达飓风的千百倍。超压和动压都是随时间变化的动力。

空气冲击波在传播方向上遇到障碍时还会在阻挡面上产生反射。由于高速运动分子受阻引起能量转换，使得作用在反射面上的反射超压比原来入射冲击波的超压成倍增长。

设计一般的防护工程时，通常按工事远离爆心投影点的情况来考虑。在这种情况下，工事地面的空气冲击波都是平行地表的方向传播的，当它遇到地面建筑物时，首先在结构的迎波面上产生反射超压，其数值倍增于入射的地面冲击波超压，反射压力很快向四周低压区稀疏衰减，接着当冲击波包围并绕着整个建筑物运动时，结构各个表面都受到超压与动压的共同作用，一般地面建筑物在冲击波的这种超压与动压的强烈挤压与拖曳下，很少不被摧毁的。超压为 $0.2\sim 0.3\text{kg/cm}^2$ 的核爆空气冲击波足以破坏普通的地面建筑物并使人员受伤。对于100万吨氢弹空爆来说，造成这种破坏后果的地面破坏半径可达7公里。

动压只有在冲击波中的气流绕过物体运动时才发生影响，它对物体的迎波正面、侧面、背面施加的压力荷载不仅大小不同而且符号也可能相反，例如正面受压力，背面则受吸力。动压对地下工事不起作用。

核爆空气冲击波的正压作用时间长，可达零点几秒到几秒，这反映了冲击波蕴藏着的巨大能量。正压时间长不仅增强了核爆冲击波对于结构物的动力作用，而且使得核爆冲击波特别不易削弱，并具有无孔不入的性质。

冲击波负压的数值虽然不大，但作用特殊，也是设计防护工程时的一个不容忽视的因素。核武器空中爆炸全部能量中，约有55%表现为冲击波。

2. 热辐射

核爆炸的火球温度高达几千万度，发射出强光与热，称为热辐射。空爆时热辐射的能量约占整个核爆能量的35%。

热辐射以光速传播，所以在冲击波到达以前就使被照射的地面物体温度升高，引起物体的燃烧和熔化。热辐射能直接烧伤暴露着的人员皮肤或引燃衣着造成间接烧伤。直视闪光还会烧伤眼底而失明。就100万吨氢弹空爆而言，热辐射能使远离15公里处的人员轻度烧伤并引起火灾。

热辐射的作用时间较短，从小当量核爆时的零点几秒到大当量爆炸时的几十秒，所以辐射的热能只能为物体的表面吸收。易燃材料只要避开直接照射或者设法用不燃材料加以遮挡都能防止损伤。

3. 早期核辐射

早期核辐射是爆炸瞬间和爆炸之后立刻产生的核辐射，一般指核爆炸最初几十秒或一分钟内释放出来的 γ 射线与中子流，这种看不见的射线与中子流能在空气中穿透相当远的距离，具有贯穿一定厚度物体的能力，并能损害生物组织，又称为贯穿辐射。中子流只发生于核爆反应的瞬间。

γ 射线在真空中以光速直线前进，但在大气中会发生散射，可从四面八方射向目标，

但大部分仍来自爆心方向。中子流的速度比光速小，也象 γ 射线一样会有散射。所以核辐射不象热辐射那样容易阻挡，需要相当厚的材料在各个方向将人员挡起来。

受核辐射照射的剂量大小用“伦”作单位，人员一次照射的安全剂量为50伦以下。

核爆时地面早期核辐射剂量与武器的当量、爆炸方式、离开爆心距离等因素有关。距离愈大，核辐射愈为分散，受大气吸收和散射的消耗愈多，因而剂量愈低。在地面冲击波超压相等的情况下，地面早期核辐射剂量以小当量武器爆炸时为严重。例如100万吨空爆时地面超压为 1 kg/cm^2 处的早期核辐射剂量不到50伦，而3万吨空爆时同一超压处的早期核辐射剂量可达2000伦以上。

早期核辐射在穿透一定厚度的材料后会被削弱，材料的厚度和容重愈大，削弱作用愈强。通常情况下，地下工事依靠覆土与结构厚度，就能使贯穿到工事内部的地面核辐射削弱到允许的程度。核辐射由于散射还能从出入口通道拐弯并穿透防护门进入工事内部。

4. 放射性沾染

核爆炸产生一系列带有放射性的反应产物，它们在爆炸后凝成微粒，或与爆炸时扬起的尘土结成较大的颗粒，成为放射性灰尘降到地面。此外，在早期核辐射的中子流作用下，爆区土壤和其他物质中的某些元素也会产生放射性，称为感生放射性。放射性灰尘的沉降颗粒，地面的感生放射性物质，连同核爆炸时来不及参加反应的残留核装料，都能在一个较长的时期内不断放出 γ 射线和其他射线，这些统称剩余核辐射，在爆区和核爆炸烟云经过的区域内为害生物和人员，造成所谓的放射性沾染。

地爆时的核反应产物混同大量的地面尘土重新落到地面后会造成严重的放射性沾染。空爆的爆炸产物大部分漂浮空中，缓慢地下落到很大面积上，地面受到的沾染程度较轻。空爆的放射性沾染主要是地面感生放射性物质造成的。

放射性沾染杀伤人员的特点是持续时间长、伤害途径多。当人员接近被沾染的地面和物体时，可直接受到射线照射引起射线病；人员也可能因吸入污染的空气，吃进污染的食品和水，引起内照射伤害；当放射性灰尘直接落在皮肤上还会引起灼伤。

5. 电磁效应

核爆炸本身能发出持续时间很短的电磁脉冲，另外早期核辐射和热辐射也能引起空气电离使大气电气性质发生变化，这些电磁效应虽然对工事结构没有直接危害，但能严重干扰电磁波通讯讯号，使一些电子电气设备暂时失灵。

6. 成坑效应

核武器接近地表或接地爆炸，会掀起大量泥土石块，形成巨大弹坑。例如2万吨当量核武器接地爆炸时，在一般干燥土壤中产生的弹坑直径可接近百米，深度超过20米。在弹坑以外还有更大范围的破裂区和塑性变形区。成坑作用中被抛起的飞石能落到很远的距离也会造成危害。处于弹坑区及近邻的工事将无法幸存。

7. 地运动

接地爆炸造成强烈的地运动，这种作用往往是爆炸能量直接输入地面以及通过很高压力的空气冲击波撞击地面的结果。处于爆心附近的地下工事这时不仅受到很大的土压，而且遭受强烈的震动，即使工事有足够强度不被摧毁，但地震所引起的巨大加速度和速度的影响足能杀伤内部人员并破坏内部设施。一般来说，这种强震波在土中传播时衰减较快，所以远处的地下工事可不考虑地震动的作用，后者只承受当地的地面空气冲击波引起

的一般的土中压缩波，其相应的土体运动加速度和速度均比较小，这时只需考虑压缩波对工事的压力作用。

设计普通地下工事只考虑核武器在远处爆炸，所以上述各种核武器效应中，起作用的主要是空气冲击波及其引起的土中压缩波，以及核辐射。

第二节 常规武器对工事的作用

对工事起破坏作用的常规武器有普通装药的炮炸弹与火箭。除作战工事外，一般不考虑炮弹的作用。炮炸弹按其目标的作用分为普通爆破弹、混凝土破坏弹、半穿甲弹和穿甲弹。

普通爆破弹是最广泛使用的一个弹种，特点是装药量大，弹头钝，弹壳薄，使用瞬发引信或延期延信，只能侵入土中，不能侵入岩石和混凝土，主要用来杀伤地面人员和破坏地面建筑物，也用来破坏土中防护工事。普通爆破弹多数装填梯恩梯炸药或混合装药，也有装填高效烈性炸药的。炮炸弹的大小有按“口径”分级的，也有按重量分级的，所谓口径也是指炮炸弹的名义重量（单位为公斤），口径数与实重很接近。

就对工事的破坏作用来说，炮炸弹与火箭这三者都是相似的。工事按指定大小的某一常规武器设计，往往只是作为一种尺度来标明其防护能力的高低。

一般炮炸弹造成的破坏主要由于命中目标时的“冲击”作用和炸药的“爆炸”作用。炮炸弹地上爆炸时，主要以爆炸空气冲击波和弹片并通过普通建筑物的崩塌、火灾等次生灾害对附近的人员设施造成较大危害，但它对地下工事的作用范围比较有限。

炮炸弹接触工事表面并爆炸时形成弹坑，弹坑周围材料可出现粉碎、开裂和其他损伤。具有侵彻能力的炮炸弹是先侵入一定深度而后爆炸，更加重了破坏的程度。侵入土中或结构介质内部处于填塞状态的爆炸因能量不能逸出空中，所以破坏作用更大。如果工事厚度不足，炮炸弹的这种接触破坏可以穿透整个厚度，或者虽然没有贯穿，但将工事内壁的混凝土材料震塌剥落并飞出碎块。

侵彻、震塌、贯穿等都发生于弹着点附近的局部地方，称为局部破坏（图 1-2）。侵彻通常是冲击作用引起的，弹坑及震塌则由冲击和爆炸作用共同引起，但主要是爆炸作用

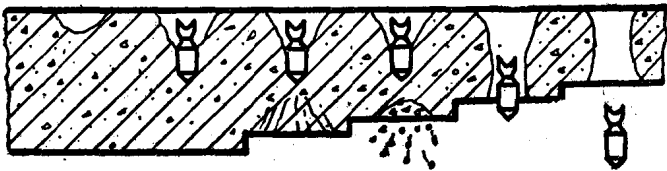


图 1-2 炮炸弹的局部破坏

（指普通爆破弹）。此外，冲击和爆炸产生的动载还使结构发生整体位移和内力，称为整体作用。一般来说，接触爆炸时的局部破坏是主要的。设计炮炸弹直接命中的工事，主要是满足防震

塌的要求，所以在结构混凝土的内表面层内，往往设置柔性的钢丝（筋）网，以提高抗震塌的能力。

普通炸药的爆炸只是一种化学反应过程，称为化爆。其释放的能量和温度无法与核爆相比，既无核辐射，也无热辐射。化爆产生的空气冲击波的作用时间十分短促，一般仅几毫秒，在传播过程中强度减少得很快，也比较容易削弱。化爆空气冲击波对结构和人员的杀伤作用比起超压峰值相同的核爆冲击波要小。

炮弹侵入岩土中爆炸产生土中压缩波。这种土中压缩波和上面所说的空气冲击波对于结构只起整体作用，但当爆心很靠近工事时，也会使工事发生局部破坏。

第三节 地下工事的防护原则

工事对武器作用的防护必须从整体规划和建筑布置等多个方面考虑，这里主要从结构的角度提供一些原则。

1. 核爆冲击波的防护

核爆空气冲击波对地下工事的破坏途径主要有：1) 破坏出入口和通风口附近的地面建筑物或挡土墙，使得工事口部堵塞；2) 直接进入工事的各种孔口，破坏口部通道、临空墙以及孔口防护设备，杀伤内部人员；3) 压缩地表面产生土中压缩波，通过压缩波破坏工事被复结构。

所以工事的出入口和通风口应避开地面建筑物的倒塌范围，出入口露出地面部分宜做成破坏后易于清除的轻型构筑物。应该设置二个以上的出入口，并保持不同朝向和一定距离以减少同时遭到破坏的可能性。工事被复结构和口部构件要按照冲击波和压缩波的动力作用进行设计，为此应尽量利用工事上方自然地层的防护能力，并应合理选择口部位置和有利地形，以减少冲击波对口部的反射超压和压缩波的强度。上述这些原则同样也适用于对炮弹的防护。

出入口的防护门、防密门和防密盖板，通风口的防爆活门和阀门，排水系统的消波防爆装置以及电力通讯管道的防爆密闭装置等口部设备必须有足够的抗力。

2. 热辐射和早期核辐射的防护

热辐射对地下工事没有直接破坏作用，但如地面有密集建筑群，就有可能引起大面积的持续火灾，燃烧时间可持续数小时。长时间的高温能降低覆土较薄的地下工事的强度，并使工事内部温度升高乃至断绝外部新鲜空气的供给。

防护（密）门、防爆活门等宜避开热辐射直接照射，门外的电缆等应埋入地下防止烧坏。设备上的外露胶条、木板等易燃物应采取保护措施如敷以白漆，白石棉粉等浅色涂料，或裹以隔热耐高温材料。

早期核辐射对于工事本身没有破坏作用。地下工事有一定的埋深，一般不必考虑早期核辐射透过土壤覆盖层和工事被复进入内部的危害。为了减少从出入口进入并穿透通道临空墙和防护门到达室内的核辐射，各道防护门密闭门加起来要有一定的总厚，通道也要有一定的长度。增加通道拐弯数对削弱来自口部的辐射最为有效。与通道紧邻的个别房间如可能透入较大剂量的辐射，可以在建筑布局上安排合适的用途。

3. 炮弹的防护

按炮弹直接命中并且要求不产生局部震塌破坏的工事，需要有很大的结构厚度，耗费材料甚巨。由于炮弹直接命中地下工事造成的破坏毕竟比较局部，所以普通的人防工事只按核爆地面冲击波超压来确定结构尺寸，不考虑炮弹直接命中。但即使如此，也必须在设计中采取分散布置等措施，将炮弹可能直接命中所带来的杀伤效果减低到最小程度。为了防止孔口设备被炸坏，使工事丧失进一步抵抗核爆冲击波和防毒的能力，防护门、防爆活门等应尽量靠里设置。

有炮弹直接命中防护要求的地下工事，一般宜在工事上方设置遮弹起爆层，迫使炮弹离开工事一定距离以外爆炸。采用这种防护方法要比炮弹紧贴工事表面爆炸来得经济。

4. 对化学生物武器和放射性沾染的防护

毒剂、细菌和放射性尘粒虽然性质不同，但都从孔口进入工事内部，所以在工程防护上有其共同点，主要是采取密闭措施，将工事与外界隔绝起来。所有的孔口均应配备密闭装置。对于联通的大面积地下工事，要有分段密闭措施。

对于外界染毒时仍需进风的工事，进风系统应设置除尘滤毒设备。通风系统的设计应使密闭门内通道的空气压力稍高于外部，以利于防止毒剂渗入。

口部设备如防密门等各种装置应在结构上有足够强度，使遭到冲击波袭击后仍不失其密封性能。

第二章 核爆炸空气冲击波及其荷载

第一节 空气冲击波特性

爆炸是能量在瞬间内集中释放的结果。当爆炸发生在空气介质中时，反应区内瞬时形成的极高压力与周围未扰动的空气处于极端的不平衡状态，于是形成一种高压波从爆心向外运动，这是一个强烈挤压邻近空气并不断向外扩展的压缩空气层，它的前沿犹如一道运动着的高压气体墙面，前沿上的超压值最高，靠里则逐渐降低。当压缩区的前沿离开爆心一定距离以后，由于气体运动的惯性影响以及在爆心处得不到能量的进一步补充，于是在紧随压缩区之后就出现了压力低于正常大气压的空气稀疏区。紧密相连的压缩区和稀疏区脱离爆心向四周传播（图2-1a），这就是空气冲击波。图2-1c是压缩区和稀疏区内的压力分布情况。压缩区的前沿与未扰动空气的分界面称为冲击波的波阵面或波头。在波阵面上，气体的压力、密度、温度和空气分子的运动速度都突跃到最大值，这是冲击波的主要特点。波阵面以超声速向前推进，由于能量的空间扩散和消耗，离开爆心愈远，波阵面的超压不断降低，同时压缩区和稀疏区的厚度也愈来愈大，最后转变为普通的气流。

图2-1b表示了冲击波通过空间某一点时，该处压力随时间的变化情况。冲击波来到时，该处超压瞬时由零增到峰值 ΔP_z ，然后随着压缩区通过，该点压力不断减小，紧接着稀疏区通过，超压变为负值，负压逐渐增大到最大值 ΔP_- 后又逐渐减小并恢复到正常大气压。压缩区通过的持续时间称为正压作用时间 t_+ ，稀疏区通过的持续时间称为负压作用时间 t_- 。

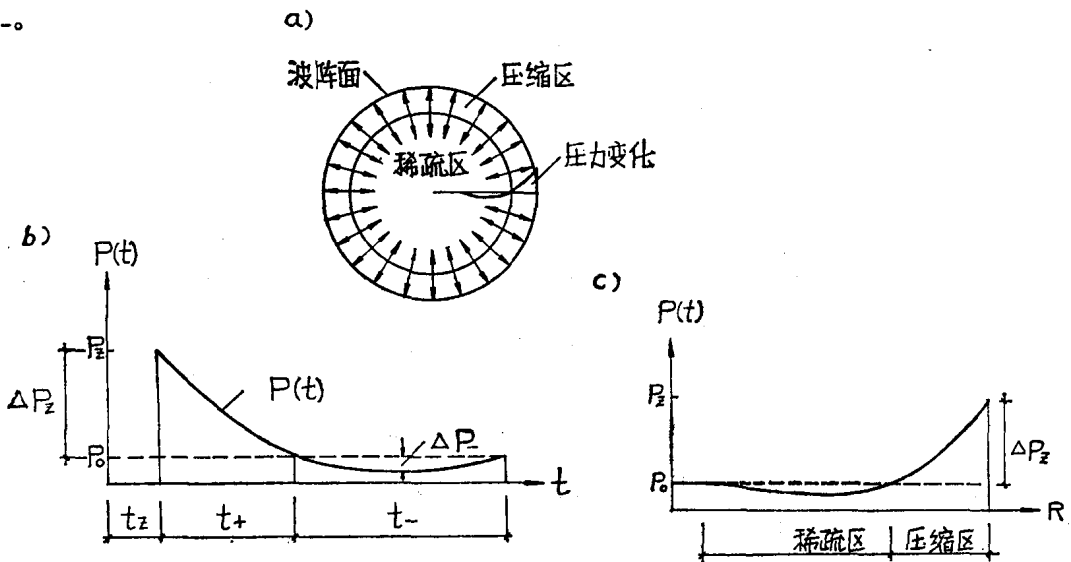


图 2-1 空气冲击波

图中符号： P_z —波阵面绝对压力 kg/cm^2 ； P_0 —正常大气压力 kg/cm^2 ； ΔP_z —波阵面超压 kg/cm^2 ， $\Delta P_z = P_z - P_0$ ； ΔP_- —冲击波最大负压 kg/cm^2 ； t_z —波阵面从爆心到某一固定点的时间 sec ； t_+ —冲击波正压作用时间 sec ； t_- —冲击波负压作用时间 sec ； R —离爆心距离 m

冲击波阵面接触到未扰动空气的质点时，使后者获得很大的速度向前运动，但波阵面内空气质点的运动速度总是低于波阵面本身的传播速度，因此被波阵面“俘获”的空气分子质点不断落在波阵面的后面，质点运动速度也不断降低，当它落到压缩区的后边界时，运动速度接近于零，之后质点作反向运动，运动的速度与空气的稀疏程度成比例。

所以，冲击波的作用由于气体受压缩而具有超压以外，还由于空气质点运动所形成的“暴风”，使得冲击波又具有动压作用，动压 q 的定义是：

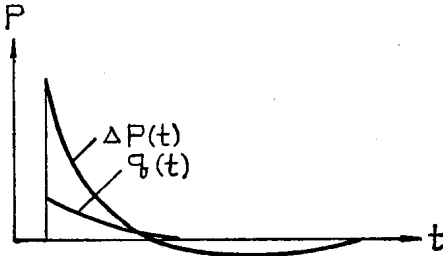


图 2-2 超压、动压随时间的变化

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2$$

式中 ρ —— 气体密度；

v —— 气体分子的运动速度。

波阵面上具有最大动压 q_m ，其与波阵面上的峰值超压之间有以下关系：

$$q_m = 2.5 \frac{\Delta P_z^2}{\Delta P_z + 7.2} \quad (2-1)$$

动压随时间的变化规律与超压相似（图2-2），动压的作用时间比超压的正压作用时间稍长。对于较强的空气冲击波，峰值动压的数值可大于峰值超压。

波阵面超压是冲击波最主要的参数，冲击波的其他运动参数和波阵面上气体的状态参数都决定于波阵面超压。表2-1列出了波阵面上的空气密度 ρ_z 、绝对温度 T_z 、空气声速 c_z 、空气质点运动速度 v_z ，以及冲击波波阵面的传播速度 D 等参数与波阵面超压 ΔP_z 的关系。

冲击波波阵面参数（自由大气中的理想冲击波）

表 2-1

ΔP_z (kg/cm ²)	D (m/sec)	v_z (m/sec)	c_z (m/sec)	ρ_z (kg-sec ² /m ⁴)	T_z (°K)
1	460	174	377	0.201	353
3	636	377	436	0.306	467
5	772	518	471	0.381	552
0 正常大气	340	—	340	0.125	288

在理想情况下，离开爆心距离 R 处的冲击波波阵面超压 ΔP_z 是比值 $\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}$ 的单调函数，

其中 Q 是爆炸当量。另外正压和负压作用时间 t_+ 和 t_- ，也有 $\frac{t_+}{\sqrt[3]{Q}}$ 及 $\frac{t_-}{\sqrt[3]{Q}}$ 是比值 $\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}$ 的单值函数关系。所以在当量分别为 Q_1 及 Q_2 的两次爆炸中，如果离爆心分别为 R_1 及 R_2 处，有相等的冲击波波阵面超压，则在这两次爆炸当量和爆距之间，具有下列关系：

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\sqrt[3]{Q_1}}{\sqrt[3]{Q_2}} \quad (2-2)$$

在符合上式关系的前提下，即在这二个具有相等波阵面超压的冲击波之间，它们的正压作用时间 t_{+1} 、 t_{+2} 以及负压作用时间 t_{-1} 、 t_{-2} 也具有下列关系

$$\frac{t_{+1}}{t_{+2}} = \frac{t_{-1}}{t_{-2}} = \frac{\sqrt[3]{Q_1}}{\sqrt[3]{Q_2}} \quad (2-3)$$

式(2-2)和(2-3)就是爆炸相似律, 试验证明它是近似可用的。利用爆炸相似律, 从小型爆炸得出的结果换算到大型爆炸, 从化爆得出的结果换算到核爆(爆炸时上式中的当量 Q 应为爆炸能量中转换为空气冲击波的那一部分)。目前有各种各样的经验公式来求 ΔP_z 、 $\frac{t_+}{\sqrt[3]{Q}}$ 、 $\frac{t_-}{\sqrt[3]{Q}}$, 多数都表示为 $\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}$ 的函数式。由于试验条件及计算假定上不尽相同, 它们之间存在一定的差异。

以上所说的是空气冲击波在自由大气中运动的情况。当冲击波在行进方向正面遇到不动障碍面受阻时, 会在障碍面上产生很大的反射压力, 冲击波的动压此时为零。正反射时的最大反射超压 ΔP_f 与入射波波阵面上的最大超压 ΔP 之比称为反射系数 K_f , 其数值可按下列理论公式计算:

$$K_f = \frac{\Delta P_f}{\Delta P} = 2 + \frac{6\Delta P}{\Delta P + 7} \quad (2-4)$$

从上式可以看出, K_f 值随入射超压的增加而增加, 最大可达8, 至少为2。

如入射波方向与障碍面斜交, 且入射角(入射波运动方向与障碍面法线之间的夹角) α 小于 $40^\circ \sim 50^\circ$ 左右, 这时的斜反射系数与正反射时($\alpha = 0$)相差不多, 入射角继续增大时, 反射系数迅速减小(图2-3)。入射角为 90° 时冲击波沿障碍面运行, 将不产生任何反射。

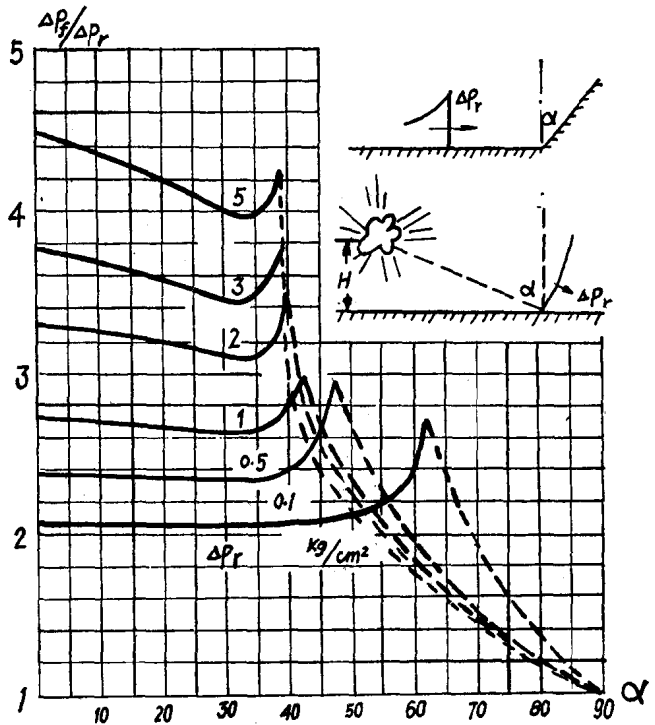


图 2-3 反射系数

第二节 核爆时的地面空气冲击波

一、地面冲击波

我们先讨论空爆情况, 空爆时的冲击波呈球形向外传播, 首先在爆心投影点及其附近遇到地表面产生正反射, 所以地表一开始就受到反射压力, 其数值比入射压力成倍增长。空气进一步被挤压密实, 导致压力升高的状态向反方向传播, 形成反射冲击波(图2-4), 反射波所到之处, 压力较入射波中更高, 在爆心投影点以外的地表处, 由于入射波波阵面与地表斜交而产生斜反射, 这时被滞止的并非入射波阵面后空气质点的整个运动, 而只是垂直地表的运动分量, 反射波的波阵面也与地表成一角度, 所以反射波的波阵面也是一个

曲面。由于反射波是在已被入射波压缩和加热过的空气介质中传播的，压力又高，所以反射波阵面的传播速度比入射波大得多。离开爆心愈远，反射波阵面与地表的夹角即反射角比入射角更大。在离开爆心投影点的距离约为爆高 H 的地表处，反射波阵面终于赶上入射波阵面，贴合成为一个单一的冲击波称为合成冲击波或马赫波，这时的入射角近似等于 45° 。反射波阵面与入射波阵面的贴合是逐次沿着高度发展的，所以合成波阵面的高度(称为马赫杆)随着离开爆心投影点的距离增加而不断增加。入射波、反射波和合成波三者波阵面的交点称为三重点如图2-4所示。

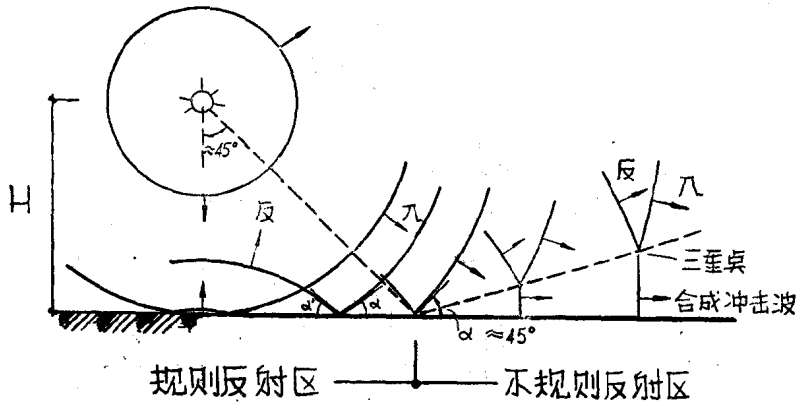


图 2-4 空爆时的地面空气冲击波

离开爆心投影点距离 $r \geq H$ 的地面范围内为合成波作用区，称为不规则反射区或空爆远区。这里的地表或地面工事受到沿着地表运行的合成冲击波的作用，地面受到的是合成冲击波的入射超压。

离开爆心投影点距离 $r < H$ 的地面范围内称为规则反射区或空爆近区。这里的地面冲击波是反射波，地面受到的是反射压力的作用。当 $r < 0.2H$ 时可近似看成为正反射，大于这一距离时为斜反射。只在爆心投影点附近的地表处由于是正反射而没有动压作用，在其他区域内的地面冲击波均兼有超压与动压二种作用。

当爆心高度接近地表，爆高 $H \leq 0.35\sqrt[3]{Q}$ 时，爆炸火球接触地面称为地爆。地爆时空气冲击波阵面的形状呈半球形(图2-5)地面空气冲击波的传播方向可认为与地表平行，与地面不产生反射现象。在冲击波传播范围内，地爆的能量密度可近似看作是同一当量的核弹在空中爆炸时的二倍。

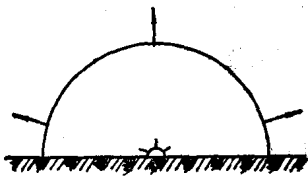


图 2-5 地爆时的地面空气冲击波

无论空爆或地爆，地面空气冲击波的最大超压 ΔP_0 、最大负压 ΔP_- 、正压作用时间 t_+ 、负压作用时间 t_- 以及最大动压 q_m 均可从有关手册中查到。压力的数值取决于相对爆高 $H/\sqrt[3]{Q}$ 和离开爆心投影点的相对距离 $R/\sqrt[3]{Q}$ ，表2-2列出了几种峰值超压下的 ΔP_- 、 t_+ 、 t_- 值可供参考。

为使地面造成超压为某一数值的最大破坏半径，相应的爆高称为最优爆高(从防护角度来看为最不利爆高)。如这一超压值很大，最优爆高为零即为地爆。如这一超压不是很大约小于 $2.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 时，则空爆产生的地面破坏半径要大于地爆时的情况。

空气冲击波超压(正压)随时间变化的规律用式(2-5)表示。 ΔP_d 愈大,压力衰减愈快,式中的衰减指数 α 愈大。当 ΔP_d 为 1kg/cm^2 左右时, α 的值约为1.5左右。

$$\Delta P(t) = \Delta P_d \left(1 - \frac{t}{t_+} \right) e^{-\alpha \frac{t}{t_+}} \quad (2-5)$$

表 2-2

ΔP_d (kg/cm^2)	ΔP_- (kg/cm^2)	t_+ (sec)			t_- (sec)		
		Q = 3 万吨	15 万吨	100 万吨	3 万吨	15 万吨	100 万吨
1	0.13	0.66	1.1	2.1	2.1	3.6	6.8
3	0.22	0.50	0.85	1.6	1.9	3.3	6.2
5	0.28	0.44	0.75	1.4	1.8	3.2	5.9

注:表中数据相当于 $H/\sqrt[3]{Q} = 1$ 时的情况,对于其他爆高,结果出入不大。

二、地面冲击波对地面物体的作用

对于平坦的地表,不存在地面冲击波绕过地表运动的情况,所以地表只受到冲击波超压而无动压产生的荷载。爆心投影点附近的地面空气冲击波本身没有动压,所以地面上的物体也只有超压的作用。除此以外,地面冲击波遇到地面上的建筑物时,由于冲击波绕过物体运动,所以物体受到超压以外,还将受到动压的作用。

下面,我们来分析沿着地表运动的地面冲击波正面遇到封闭建筑物后的情况(图2-6)。这种情形发生在地爆或空爆远区。

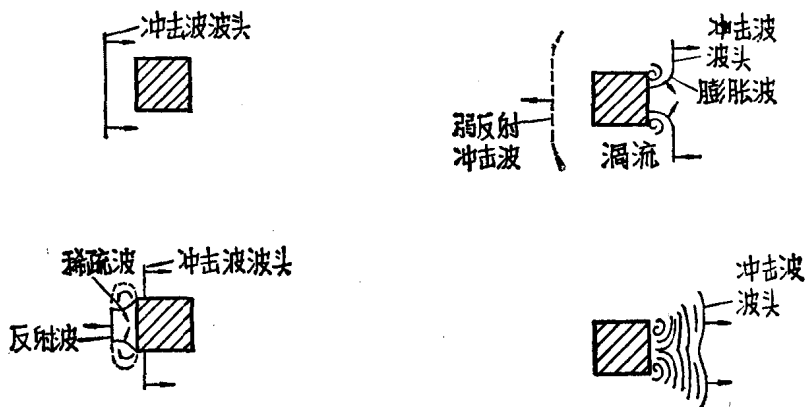


图 2-6 地面冲击波作用于封闭式建筑物的各个阶段

当冲击波与目标物的前墙相碰时产生正反射,所以前墙瞬时受到骤然增大的反射超压,在前墙附近产生高压区。前墙上的峰值反射超压可按式(2-4)确定,其中的入射超压是入射地面冲击波的波阵面超压。在前墙边缘外,入射冲击波运动没有受到障碍,相对来说这里是低压区。于是高压区的空气从其边缘向内部逐渐稀释,这种稀疏状态的传播称为稀疏波。稀疏波所到之处使前墙面上的各点压力迅速下降,这种压力分布的相对改变与波的运动要一直延续到空气流动状态相对稳定时为止。

从冲击波接触前墙反射到冲击波开始稳定的绕着前墙运动所需的时间称为环流时间，环流时间 t_1 与墙面尺寸及稀疏波的传播速度有关，后者又与冲击波阵面的速度有关， t_1 (sec)可近似的取为：

$$t_1 = 3 \frac{S}{D}$$

式中 S 是前墙高度或二分之一的墙宽，取其中的较小者，单位为米； D 为地面冲击波阵面速度。

$$D = 340 \sqrt{1 + 0.83 \Delta P_0} \quad \text{m/sec} \quad (2-6)$$

环流稳定时 ($t \geq t_1$) 作用于前墙上的压力称为环流压力，它等于地面入射冲击波超压 $\Delta P(t)$ 与动压 $q(t)$ 二个作用之和。由于目标物的形状不同，墙面相对于气流流动方向的位置也可能不同，因而不同墙面所受到的动压作用的压力值也就不同。这个差别可用试验确定的不同系数 C_d 来表示。动压作用引起的墙面压力等于 $C_d \cdot q(t)$ ， C_d 称为表面阻力系数。

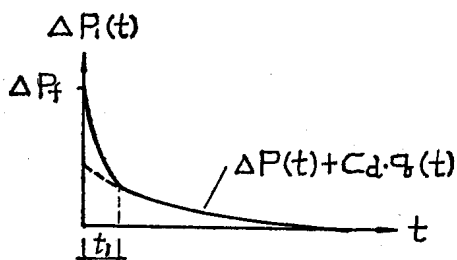


图 2-7 前墙压力变化

若以冲击波开始作用于前墙的时间取为 $t = 0$ ，则前墙的压力在 t_1 的时间内从 ΔP_0 降到 $\Delta P(t_1) + C_d \cdot q(t_1)$ 。此后，当 $t > t_1$ ，整个前墙上的单位面积平均压力 $\Delta P_1(t)$ 可用下式表示：

$$\Delta P_1(t) = \Delta P(t) + C_d \cdot q(t)$$

矩形建筑物前墙的阻力系数 C_d 约为1.0。前墙上的压力变化过程见图2-7。

顶盖、侧墙和背墙上的每一点压力自冲击波到达该点起，自始至终为地面冲击波超压与动压作用之和，等于 $\Delta P(t) + C_d q(t)$ 。与前墙不同的是没有开始时的反射压力及其稀疏过程。虽然冲击波从侧面掠过顶盖和侧墙，但由于涡流等原因，侧墙和顶盖仍受到动压作用，这里的阻力系数为负值即受吸力。背墙在冲击波动压作用下也受吸力，阻力系数 C_d 约为-0.5。值得注意的是这些墙面上各点受到压力的时间有先后，因为冲击波往前传播有一个过程。因此侧墙或背墙上的压力如以整个墙面平均起来计算，将有一个升压时间。

所以对这一矩形建筑物来说，作用于前墙和后墙上的压力波形不仅在数值上大小悬殊，而且作用时间有前有后。建筑物的各个墙面各自受到巨大压力的挤压作用，同时由于前、后墙的压力差，使得整个建筑物受到强大的水平推力，有使整个建筑物平移和倾复的可能。

对于细长形目标物如烟筒、塔楼以及桁架杆件等，它们的横向线性尺寸很小，相应的环流时间 t_1 非常短促，可以近似认为目标迎波面上的反射超压瞬时下降到环流压力。此时，目标物四周作用有相同的冲击波超压值和不同的动压值，整个物体所受的合力就只有动压的作用。其大小可用下式表示：

$$F(t) = C_d \cdot q(t) \cdot A$$

式中， $q(t)$ 为动压； A 为物体在垂直冲击波运动方向上的投影面积； C_d 为物体阻力系数，由试验确定。所以，这种细长形目标物在冲击波作用下遭到抛掷和弯折，主要是动压作用的结果。